中国生态农业学报 2017 年 10 月 第 25 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2017, 25(10): 1475−1484

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170272

李东晓, 王红光, 张迪, 赵国英, 李浩然, 贾彬, 李雁鸣, 李瑞奇. 水分亏缺对不同小麦品种矿质元素吸收分布及水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1475−1484

Li D X, Wang H G, Zhang D, Zhao G Y, Li H R, Jia B, Li Y M, Li R Q. Effect of water deficit on mineral element absorption, distribution and water utilization by different wheat varieties[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1475−1484

水分亏缺对不同小麦品种矿质元素吸收分布及水分利用的影响*

李东晓, 王红光, 张　迪, 赵国英, 李浩然, 贾　彬, 李雁鸣, 李瑞奇**

(河北农业大学/河北省作物生长调控实验室　保定　071001)

摘　要: 在限制小麦灌溉面积的大背景下, 为进一步稳产促优, 本文探讨了华北地区水分亏缺对不同小麦品种矿质元素吸收、分布特性及其与植株水分利用和产量的关系。选用 3 个生态类型冬小麦品种(抗旱品种'沧麦 6001'、丰水高产品种'邯麦 9'和多抗超高产品种'济麦 22'), 设置正常和水分亏缺两个水平的人工气候室箱体栽培试验, 主要调查了小麦不同器官矿质元素含量、积累量变化、分配比以及矿质元素变化对水分利用效率和产量的影响。结果表明, 矿质元素的含量和分配具有器官特异性, 其中小麦叶片 Ca、籽粒 Cu 和 Zn、茎秆 Na 的含量、分配比最高; Fe 含量、积累量及 Fe 分配比因品种、器官、水分差异而不同: 正常水分下, '沧麦 6001'以茎秆、'邯麦 9'以叶片的 Fe 含量、分配比最高; '济麦 22'以茎秆和颖壳 Fe 含量较高, 以叶片和颖壳 Fe 分配比较高。而水分亏缺下, '沧麦 6001'和'邯麦 9'Fe 含量以籽粒最高, '济麦 22'以叶片最高; 3 品种 Fe 分配比均以籽粒最高。此外, 水分亏缺增加了小麦籽粒 Cu、Zn 含量及分配比, 籽粒 Zn、Na 和 Ca 积累量, 显著增加'沧麦 6001'的水分利用效率和产量以及'济麦 22'的产量水分利用效率; 而降低了'沧麦 6001'籽粒 Mn、'邯麦 9'籽粒 Cu 和 Mn、'济麦 22'籽粒 Cu 和 Fe 积累量以及'邯麦 9'水分利用效率、干物重、产量。综上, 水分亏缺下, '沧麦 6001'更易高产高效, 籽粒 Fe 含量增加, 但需补充一定的 Mn 元素; '济麦 22'的水分利用效率增加, 产量未显著下降, 需补充一定 Fe 元素保证品质; '邯麦 9'产量和水分利用效率均显著下降, 且籽粒中 Cu 和 Mn 积累下降明显。相关分析表明, Cu、Zn、Ca、Mn 含量与干物重变化之间存在一定的相互调节作用, 但未直接影响产量和水分利用效率, 这可能与品种间差异及品种和水分互作影响有关。但矿质元素可能通过影响干物重间接调控水分利用效率的趋势是存在的, 尚需进一步研究和验证。

关键词: 小麦; 生态类型; 水分亏缺; 矿质元素; 产量; 器官分配比; 水分利用效率

中图分类号: S512.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2017)10-1475-10

Effect of water deficit on mineral element absorption, distribution and water utilization by different wheat varieties*

LI Dongxiao, WANG Hongguang, ZHANG Di, ZHAO Guoying, LI Haoran, JIA Bin, LI Yanming, LI Ruiqi**

(Hebei Agricultural University / Key Laboratory of Crop Growth Regulation in Hebei Province, Baoding 071001, China)

* 国家科技支撑计划重大项目"粮食丰产科技工程"(2013BAD07B05)、国家小麦产业技术体系保定综合试验站(CARS-03-2-3)和河北农业大学作物学科梯队建设基金(TD2016C317)资助

** 通讯作者: 李瑞奇, 主要研究方向为小麦栽培生理。E-mail: li-rq69@163.com

李东晓, 主要研究方向为作物逆境生理生态。E-mail: lidongxiao.xiao@163.com

收稿日期: 2017-03-29　接受日期: 2017-06-08

* This study was supported by the National Key Technology R&D Program of China (2013BAD07B05), the National Wheat Industry System (CARS-03-2-3), and the Fund of Research Group Construction for Crop Science in Hebei Agricultural University (TD2016C317).

** Corresponding author, E-mail: li-rq69@163.com

Received Mar. 29, 2017; accepted Jun. 8, 2017

Abstract: In the context of limiting the area of wheat irrigation, it is necessary for promoting resources use efficiencies, increasing yield and improving quality of wheat to explore nutrients absorption and utilization, and water use efficiency of wheat under water deficit condition. Pot experiments were conducted in phytotrons with three wheat varieties under two water conditions (normal and drought). The three wheat varieties included 'Cangmai-6001' (drought resistant), 'Hanmai-9' (wet and high yield) and 'Jimai-22' (multi-resistance and super high yield). The content, accumulation and distribution of mineral elements in different organs of the plants were measured. Also the relationship between these indexes with water use efficiency and yield analyzed. The results showed that the contents and accumulation of mineral elements were specific to different plant organs. The highest content and distribution ratio of Ca were observed in leaf, those of Cu and Zn were in grain, Na was in stem. Fe accumulated in different organs of the plant was influenced by water and plant variety. Under normal water condition, the highest Fe content and distribution ratio were in the stem of 'Cangmai-6001', which was the same for the leaf for 'Hanmai-9'. The Fe content in stem and glume and Fe distribution ratio in leaf and glume were higher than in other organs of 'Jimai-22'. Under water deficit condition, Fe content was highest in grain for 'Cangmai-6001'and 'Hanmai-9', but it was highest in leaf for 'Jimai-22'. For all the investigated varieties, the highest Fe distribution was in grain. Water deficit increased with the distribution of Cu and Zn, accumulation of Zn, Na and Ca in grain, water use efficiency and yield for 'Cangmai-6001', and with WUE_{yield} for 'Jimai-22'. However, water deficit decreased with the accumulation of Mn in the grain of 'Cangmai-6001', Cu and Mn in grain of 'Hanmai-9', Cu and Fe accumulation in 'Jimai-22' grain, water use efficiency, yield and dry matter weight of 'Hanmai-9'. Above all, 'Cangmai-6001' was more beneficial in terms of yield increase with higher WUE, higher Fe accumulation in grain and supplemented Mn element under water deficit condition. 'Jimai-22' had stable yield with increasing WUE and supplemented Fe element in grain under water deficit condition. For 'Hanmai-9' variety, the yield, WUE, Cu and Mn accumulation in grain decreased obviously under water deficit condition. Correlation analysis indicated that Cu, Zn, Ca and Mn had significant interaction with dry matter, with no direct effect on yield and WUE. This was related with the differences in variety and interaction effects of variety and water. There was still the tendency for mineral elements to regulate water utilization by influencing wheat dry matter formation, which needed further research and verification.
Keywords: Wheat; Ecological type; Water deficit; Mineral element; Yield; Distribution ratio of organ; Water use efficiency

水资源匮乏是限制华北地区小麦(*Triticum aestivum* L.)生产和产量提高的关键因素之一。土壤中的矿质元素需溶于水以离子状态被作物吸收，以多种形式参与作物体内各种代谢和生理生化过程，并且在参与作物的水分平衡方面有一定的调节作用[1-2]。探明不同营养元素在小麦植株体内的含量与不同器官的吸收利用和分配规律以及在不同水分条件下对植株水分利用的影响，对进一步促进资源高效利用、保证小麦产量、改善小麦品质有十分重要的意义[3]。前人研究表明外界水分不足会导致土壤中的离子分布发生改变，影响离子运输，诱导作物积累大量的Na、Ca 等离子来降低细胞内的水势[4-5]。因此补充一定量的矿质元素(K 和 Ca)，可缓解胁迫对植物生长造成的不利影响，使植株耐受能力增强[6]。同样，在植株遭受干旱胁迫时，矿质元素的变化一定程度上影响了植株的水分平衡及抗旱性调节[7-9]。荒漠环境土壤中Na盐离子可提高植物的保水率，提高水分利用率[9]。当然，干旱程度不同，植株受影响程度也不同：适度干旱可增加小麦幼苗 Cu、Mn、Fe、Zn、Ca 含量，从而调节植株抗旱性；但过度干旱各元素含量降低，水分平衡遭到破坏[9-12]。目前，针对华北麦区长期水分匮乏问题，在限制小麦灌溉用水的大背景下，为维持河北省小麦高生产力必须综合考虑提高水分利用效率，走节水稳产优质的发展之路。而该地区不同生态类型小麦品种对矿质元素吸收、利用特点及其与水分利用效率之间的关系尚鲜见系统报道。本研究利用大型人工气候室模拟自然气候条件，设置水分正常和水分亏缺两种条件，试图了解 3 个不同类型小麦品种参与水分调节的主要矿质元素的区域化分布、积累，并与干物重、产量和水分利用效率之间进行相关性分析，为华北地区小麦节水栽培进一步调控营养元素配施，提高对人体有益元素含量，降低不利元素含量以及提高资源利用效率提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

选用 3 个生态适应类型的冬小麦品种，其中'沧麦 6001'(Cangmai-6001)由河北省沧州市农业科学院选育，于 1998 年经河北省品审会审定，属于冬性、抗旱性品种。'邯麦 9'(Hanmai-9)由河北省邯郸市农业科学院选育，于 2003 年经河北省审定，属于丰水高产品种。'济麦 22'(Jimai-22)由山东省农业科学院选育，于 2007 年通过国家黄淮北片审定，属于超高产、多抗品种。

试验于 2015 年在河北农业大学进行。使用独

立、自控，能调节光、温、空气湿度、CO_2浓度的人工气候室，生长室环境数据均由电脑系统自动控制并记录。春化阶段设定昼/夜温度: 20 ℃/7 ℃, 12 h/12 h (6:00—18:00); 返青及后期生长阶段设定昼/夜时长(14 h/10 h)，光照 28 000~30 000 lx，昼/夜温度为 20 ℃/15 ℃，相对湿度 60%。

采用整理箱土培，整理箱体积为(长×宽×高=55 cm×41 cm×36 cm)，土壤取自农田表层 0~20 cm，风干后碾碎，混匀并装箱，每箱土壤干重为 73.5 kg，浇灌 18 L 自来水，施基肥量为磷酸二铵 5.86 g，尿素 7.5 g，硫酸钾(50%)11.8 g。待相对含水量达 75%，使用小铲人工破碎、翻整土层 15 cm。播种日期 3 月 28 日，每箱播种 3 行，行距 10 cm。于小麦穗分化期开始至成熟收获设置正常水分(CK)和水分亏缺(D)2 种处理，水分控制采用称重法。正常水分处理将每个整理箱补水到 91.5 kg，补水下限为 86.0 kg，即相对含水量控制范围为 60%~80%；亏缺处理则补水到 86.0 kg(相对含水量为 40%~60%)，亏缺灌溉量为 24.39 mm。

每个处理设置 3 次重复。小麦生长期耗水量动态如图 1 所示，总耗水量(mm)和水分利用效率的计算公式参考刘月岩等[13]如下:

总耗水量(mm)=∑补水量+(初始重量−最后重量)　(1)

产量的水分利用效率(WUE_{yiled}，$kg\cdot m^{-3}$)=产量($g\cdot m^{-2}$)/总耗水量(mm)　(2)

生物量的水分利用效率($WUE_{biomass}$，$kg\cdot m^{-3}$)=地上总干重($g\cdot m^{-2}$)/总耗水量(mm)　(3)

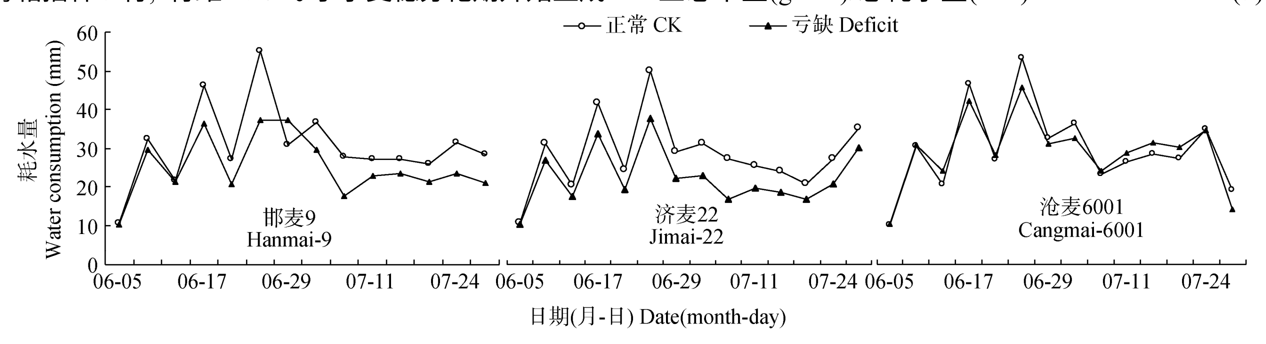


图 1　不同水分条件下不同小麦品种生育期的耗水量

Fig.1　Water consumption of different wheat varieties under normal (CK) and deficit (D) water conditions during growing seasons

1.2　测定项目和方法

1.2.1　干物质和产量

在小麦成熟期，每个处理收获 10 株，晒干后脱粒，根据箱体面积，计算平均籽粒产量。随机另选约 10 株小麦，剪断根系，留取地上部，105 ℃杀青 30 min，65 ℃烘干至恒重，分为叶片、茎秆、颖壳、籽粒 4 部分，称重后用小麦粉碎仪[莱驰 MM400，弗尔德(上海)仪器设备有限公司，德国]磨细，过 100 目筛后，密封保存，用于测定不同器官矿质元素含量。

1.2.2　矿质元素含量

采用硝酸-高氯酸消化法，称取 0.5 g 样品于消煮管中，加入 5 mL HNO_3-$HClO_4$(4∶1 体积比)，放置过夜，在消煮炉上消煮至清凉，冷却，定容至 50 mL，用微膜滤纸过滤，提取液用原子吸收分析仪(Z–5300，日立，日本)测定 Cu、Fe、Mn、Zn、Ca、Na 含量。

1.2.3　矿质元素分配比

将小麦地上部分生物量分为颖壳、籽粒、茎秆和叶片 4 部分，各器官矿质元素分配比为该器官元素积累量与地上部分该元素积累总量之比。

1.2.4　矿质元素积累量

某器官矿质元素积累量=该器官矿质元素含量×每株该器官干物重　(4)

1.3　数据处理

本研究是 2 个水分水平和 3 个品种水平的交互作用设计，采用完全随机区组排列，不同水分、品种处理对不同器官的矿质元素含量、积累量、干物重、产量和水分利用效率的影响采用二因素方差分析；水分、品种及器官因素之间各指标采用 Duncan 方法，进行多重比较。

2　结果与分析

2.1　不同水分条件下不同生态适应类型小麦品种各器官矿质元素含量变化

由表 1 可见，3 个小麦品种各器官 Mn 含量存在显著差异。其中，叶片 Mn 含量显著高于其他器官，茎秆 Mn 含量显著低于其他器官，且叶片与茎秆 Mn 含量的差异幅度为 98.47~139.74 $\mu g\cdot g^{-1}$。水分亏缺条件下，‘沧麦 6001’茎秆 Mn 含量以及‘邯麦 9’叶片、茎秆和颖壳中的 Mn 含量分别降低 31.70%、27.89%、9.12%、39.80%；而‘济麦 22’各器官 Mn 含量变化不显著。3 个小麦品种各器官 Zn 的含量也存在显著差异，其中籽粒 Zn 含量显著高于其他器官。水分亏缺条件下，‘沧麦 6001’茎秆 Zn 含量显著降低，降幅为 17.07%；但

‘邯麦 9’茎秆和‘济麦 22’籽粒中的 Zn 含量显著增加 82.20%和 32.21%，其他器官变化不明显。

水分亏缺条件下，‘沧麦 6001’叶片和颖壳 Cu 含量均显著降低，降幅分别为 42.92%和 39.30%；‘邯麦 9’茎秆、籽粒和颖壳器官 Cu 含量显著降低，分别降低 31.47%、65.02%、48.11%；‘济麦 22’籽粒和颖壳 Cu 含量显著降低，分别降低 47.81%、42.05%；‘济麦 22’茎秆 Cu 含量显著增加，增幅为 77.59%；叶片无显著变化。不同水分条件下，3 个小麦品种均表现为叶片 Ca 含量显著高于其他器官。水分亏缺条件下，‘济麦 22’颖壳 Ca 含量显著降低，降幅为 43.43%；而‘沧麦 6001’颖壳、‘邯麦 9’和‘济麦 22’籽粒中的 Ca 含量均显著增加，增幅分别为 107.00%、36.61%、9.70%。

3 个品种不同器官的 Na 含量以籽粒最低，显著低于其他器官。水分亏缺条件下，‘沧麦 6001’叶片、茎秆以及‘济麦 22’茎秆 Na 含量显著降低，降幅分别为 49.47%、60.76%、25.87%；‘邯麦 9’各器官 Na 含量变化不显著。各品种不同器官 Fe 含量变化幅度较大。水分亏缺条件下，‘沧麦 6001’叶片、茎秆、颖壳中 Fe 含量显著降低，降幅分别为 36.50%、84.68%、43.61%；‘邯麦 9’叶片以及‘济麦 22’茎秆、籽粒、颖壳中 Fe 含量显著降低，降幅分别为 45.68%、56.37%、52.27%、74.37%；‘沧麦 6001’和‘邯麦 9’籽

表 1 水分亏缺下不同小麦品种各器官 Mn、Zn、Cu、Ca、Na 和 Fe 含量

Table 1 Contents of Mn, Zn, Cu, Ca, Na and Fe in different organs of different wheat varieties under water deficit condition

水分 Water condition	品种 Variety	器官 Organ	Mn ($\mu g \cdot g^{-1}$)	Zn ($\mu g \cdot g^{-1}$)	Cu ($\mu g \cdot g^{-1}$)	Ca ($mg \cdot g^{-1}$)	Na ($mg \cdot g^{-1}$)	Fe ($mg \cdot g^{-1}$)
正常 Normal	沧麦 6001 Cangmai-6001	叶片 Leaf	159.41±32.02c	72.47±5.94ghij	19.48±0.84cde	38.68±8.54cd	2.26±0.18cd	0.75±0.06def
		茎秆 Stem	35.77±4.06jkl	65.54±3.65hijk	14.46±3.34efgh	2.84±0.59fgh	5.06±0.69a	1.67±0.28a
		籽粒 Grain	80.05±9.87fgh	148.05±11.37a	17.39±2.51cdef	0.88±0.07gh	0.06±0.01g	0.38±0.09hijk
		颖壳 Glume	127.89±11.43d	122.30±17.01bc	17.25±2.10cdef	4.97±0.20fgh	1.67±0.01e	0.82±0.12d
	邯麦 9 Hanmai-9	叶片 Leaf	114.63±7.69de	51.90±6.31k	9.03±0.42hijk	43.37±4.43ab	1.04±0.06f	1.05±0.09c
		茎秆 Stem	16.16±0.34l	29.83±6.57l	11.96±2.21fghij	3.37±0.64fgh	3.23±0.21b	0.29±0.03ijk
		籽粒 Grain	69.95±1.29ghi	112.47±2.19cd	58.08±5.31a	0.68±0.05h	0.16±0.02g	0.30±0.09ijk
		颖壳 Glume	83.33±17.50fgh	85.04±14.11efgh	13.91±1.74efghi	5.59±1.10f	1.92±0.30de	0.63±0.11defg
	济麦 22 Jimai-22	叶片 Leaf	175.74±26.89bc	83.74±5.61efgh	15.58±3.77defg	45.50±3.28ab	1.04±0.14f	0.83±0.17d
		茎秆 Stem	36.00±7.50jkl	73.25±10.81fghij	4.85±1.25k	5.63±0.74f	2.4±0.10c	1.33±0.27b
		籽粒 Grain	76.30±2.60ghi	108.85±9.38cd	53.34±6.69a	0.74±0.02h	0.11±0.02g	0.48±0.07ghij
		颖壳 Glume	85.54±3.91fgh	93.08±10.99def	18.23±0.42cde	5.60±0.62f	1.73±0.35e	1.44±0.19b
亏缺 Drought	沧麦 6001 Cangmai-6001	叶片 Leaf	215.65±26.90a	86.10±13.28efg	11.12±0.84ghij	41.46±3.78bc	1.14±0.19f	0.47±0.05ghijk
		茎秆 Stem	24.43±2.77kl	54.35±4.80jk	15.02±3.77defg	2.42±0.50fgh	1.99±0.36de	0.28±0.06jk
		籽粒 Grain	50.45±17.37ijk	125.21±13.37bc	22.41±5.02c	0.92±0.12gh	0.08±0.00g	1.28±0.13b
		颖壳 Glume	108.39±7.49def	101.03±12.32de	10.47±2.02ghij	10.29±0.92e	1.91±0.17de	0.47±0.05ghijk
	邯麦 9 Hanmai-9	叶片 Leaf	82.65±12.17fgh	57.87±9.34ijk	10.28±0.84ghijk	35.62±0.39d	0.88±0.15f	0.57±0.12efgh
		茎秆 Stem	14.68±0.20l	54.34±9.77ik	6.94±2.21jk	4.45±0.63fgh	3.28±0.14b	0.29±0.06ijk
		籽粒 Grain	63.15±4.28ghij	132.22±12.88ab	20.32±1.25cd	0.93±0.12gh	0.18±0.03g	0.70±0.16defg
		颖壳 Glume	50.17±1.87hij	77.56±5.88fghi	7.22±1.28jk	5.00±1.61fgh	1.89±0.16de	0.53±0.10fghi
	济麦 22 Jimai-22	叶片 Leaf	187.87±39.87b	106.97±19.83cd	14.88±1.25defg	46.46±3.33a	1.02±0.11f	0.80±0.05de
		茎秆 Stem	30.22±4.92kl	73.69±6.80fghij	8.61±0.84ijk	5.51±0.66fg	1.80±0.29e	0.58±0.17efgh
		籽粒 Grain	72.34±1.99ghi	143.91±15.00a	27.84±5.43b	0.81±0.04h	0.10±0.00g	0.23±0.07k
		颖壳 Glume	89.00±10.29efg	110.03±8.43cd	10.56±1.93ghij	3.17±0.89fgh	1.86±0.25de	0.37±0.06hijk
ANOVA	水分×品种 Water × variety		ns	***	***	*	***	***
	水分×器官 Water × organ		*	ns	***	ns	***	***
	品种×器官 Variety × organ		***	**	***	***	***	***
	水分×品种×器官 Water × variety × organ		**	**	***	*	***	***

CK：正常供水；D：水分亏缺。小写字母不同表示不同水分条件、不同品种、不同器官间在 P<0.05 水平差异显著；*：0.05 水平因素间互作显著；**：0.01 水平因素间互作显著；***：0.001 水平因素间互作显著；ns：因素间互作不显著。CK: normal water supply; D: water deficit. Values of different organs of different varieties under different water conditions in a column followed by different lowercase letters are significantly different (P < 0.05). *, ** and *** indicate significantly interactive effects at P < 0.05, P < 0.01 and P < 0.001, respectively. ns indicates not significantly interactive effect.

粒中 Fe 含量显著增加，分别增加了 239.00%和 136.00%。以上结果说明水分条件变化的同时改变 Fe 元素在小麦各器官的吸收和利用。

此外，水分和品种互作对 Ca 含量影响显著，对 Zn、Cu、Na、Fe 含量影响极显著。水分和植株器官互作对 Mn 含量影响显著，对 Cu、Na、Fe 含量影响极显著。品种和器官互作以及 3 种因素互作均对各元素含量影响显著或极显著。

2.2　不同水分条件下不同生态适应类型小麦品种地上部分矿质元素分配比

图 2 显示不同矿质元素积累量在各小麦品种各器官的分配比。其中，Cu、Zn 元素在 3 个小麦品种均以籽粒分配比最大; Na 元素在茎秆中分配比最大; Ca 元素在叶片中分配比最大; Mn 在叶片和籽粒中分配比均较大; Fe 元素在不同小麦品种和不同水分条件下的主要分配器官均不同。

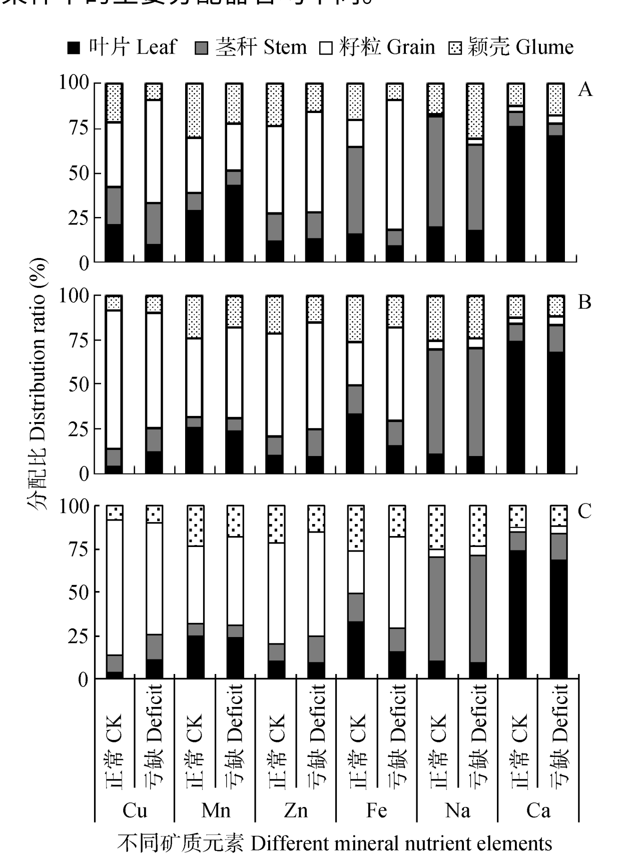


图 2　水分亏缺对‘沧麦 6001’(A)、‘邯麦 9’(B)、‘济麦 22’(C)植株不同器官矿质元素积累量分配比的影响

Fig. 2　Effect of water deficit on distribution ratios of mineral nutrient accumulation in different organs of ‘Cangmai-6001’ (A), ‘Hanmai-9’ (B), and ‘Jimai-22’ (C)

与正常水分条件相比，水分亏缺明显增加了‘沧麦 6001’籽粒中 Cu、Zn、Fe 积累量分配比，增加幅度分别为 58.89%、16.05%、380.00%; 同时叶片中 Mn 和颖壳中 Na 的分配比均明显增加，分别增加了 50.58%、80.96%。相应地，Fe 元素分配比在叶片、茎秆和颖壳中分别下降了 40.07%、81.23%和 54.14%(图 2A)。水分亏缺条件下，‘邯麦 9’茎秆中的 Cu、Zn、Ca 分配比分别增加了 46.64%、49.50%、44.98%; 籽粒中 Mn 和 Fe 的分配比分别增加了 15.48%和 151.00%; 叶片中 Cu 分配比增幅高达 197.00%(图 2B)。同时，水分亏缺使‘济麦 22’籽粒中的 Mn、Zn、Fe、Na、Ca 分配比分别增加了 20.18%、26.52%、35.17%、63.14%、72.59%; 使茎秆 Cu 和 Ca 分配比分别增加了 131.00%和 13.09%(图 2C)。

2.3　不同水分条件下不同生态适应类型小麦品种矿质元素积累量变化

由表 2 可见，不同水分条件下，3 个小麦品种 Cu、Mn、Zn 主要积累在籽粒中，除‘沧麦 6001’外，均显著高于其他器官; Na 元素主要积累在茎秆中，Ca 元素积累在叶片中，均显著高于其他器官; 各品种不同器官 Fe 积累量变化幅度较大。水分亏缺下，小麦籽粒的 Zn、Na 和 Ca 积累量增加，而小麦籽粒 Cu、Fe 和 Mn 元素积累的影响存在基因型差异。其中，‘沧麦 6001’籽粒 Cu 的积累量提高了 52.82%，而‘邯麦 9’号和‘济麦 22’籽粒分别降低了 70.85%和 32.06%。对于 Fe 元素来说，水分亏缺大幅度提高了‘沧麦 6001’和‘邯麦 9’籽粒中的积累量，分别提高了 314.00%和 127.00%; 而降低‘济麦 22’籽粒的积累量，降低了 39.00%。水分亏缺对 Mn 的影响表现与 Fe 相反。

进一步比较不同品种叶片、茎秆和颖壳矿质元素积累量变化可以发现，水分亏缺下，‘沧麦 6001’叶片和颖壳 Cu 积累量显著降低，分别降低了 53.00%和 58.00%。3 个品种叶片、茎秆和颖壳 Fe 积累量均下降，除‘邯麦 9’茎秆、颖壳以及‘济麦 22’叶片外，均呈显著性差异。‘沧麦 6001’颖壳以及‘邯麦 9’叶片和颖壳 Mn 积累量均显著下降，分别下降 40.00%、34.00%和 48.00%。‘沧麦 6001’颖壳 Zn、叶片和茎秆 Na 积累量显著降低 41.00%、55.00%、60.00%，而颖壳 Ca 积累量显著增加了 47.00%; ‘济麦 22’茎秆 Na 和叶片 Ca 积累量均显著降低 29.00%和 20.00%; ‘邯麦 9’叶片 Ca 积累量显著降低 24.00%，其他器官元素积累变化不显著。此外，水分、品种、器官因素间互作均对各矿质元素积累量影响显著或极显著。

2.4　水分利用效率的变化

由表 3 可见，正常水分条件下，‘邯麦 9’的总耗水量、地上干物重、产量、生物量和产量水分利用效率($WUE_{biomass}$ 和 WUE_{yield})均显著高于其他两个品种。‘济麦 22’的地上干物重、产量、$WUE_{biomass}$ 和

表 2 水分亏缺下不同小麦品种各器官矿质元素积累量

Table 2 Mineral elements accumulation in different organs of different varieties of wheat under water deficit condition

水分 Water condition	品种 Variety	器官 Organ	Cu (μg·plant^{-1})	Mn (μg·plant^{-1})	Zn (μg·plant^{-1})	Fe (mg·plant^{-1})	Na (mg·plant^{-1})	Ca (mg·plant^{-1})
正常 Normal	沧麦 6001 Cangmai-6001	叶片 Leaf	9.86fgh	73.02cd	36.57de	0.38def	1.15d	18.22a
		茎秆 Stem	10.35fg	25.77jk	47.51d	1.20b	3.64a	2.04ghijk
		籽粒 Grain	17.16e	78.64bc	146.53a	0.37defg	0.06k	0.87kl
		颖壳 Glume	10.22fg	75.52bcd	72.01c	0.49d	0.99d	2.95fghi
	邯麦 9 Hanmai-9	叶片 Leaf	3.78j	47.98gh	21.72e	0.44de	0.44fghi	18.15a
		茎秆 Stem	9.33fghi	12.65l	23.24e	0.23ghijk	2.53b	2.63fghi
		籽粒 Grain	75.54a	83.88ab	126.85b	0.33efghi	0.18ijk	0.76kl
		颖壳 Glume	7.74fghij	45.36gh	46.50d	0.35defghi	1.07d	3.05efghi
	济麦 22 Jimai-22	叶片 Leaf	4.23ij	48.04gh	23.06e	0.23ghijk	0.28hijk	12.54c
		茎秆 Stem	3.11j	23.09jk	47.13d	0.86c	1.56c	3.61ef
		籽粒 Grain	41.62b	60.06ef	85.19c	0.38def	0.08jk	0.58l
		颖壳 Glume	6.21fghij	29.05j	31.35de	0.49d	0.68ef	1.89hijkl
亏缺 Drought	沧麦 6001 Cangmai-6001	叶片 Leaf	4.64ij	89.37a	35.55de	0.20jk	0.52fgh	17.26a
		茎秆 Stem	10.59f	17.43kl	38.87de	0.20jk	1.45c	1.72ijkl
		籽粒 Grain	26.23cd	53.18fg	149.60a	1.53a	0.09jk	1.09jkl
		颖壳 Glume	4.32ij	45.61gh	42.21d	0.19jk	0.92de	4.33e
	邯麦 9 Hanmai-9	叶片 Leaf	3.99j	31.63ij	22.14e	0.22hijk	0.34ghij	13.72b
		茎秆 Stem	4.86hij	10.34l	38.14de	0.20ijk	2.31b	3.12efgh
		籽粒 Grain	22.02d	68.39de	142.83a	0.75c	0.20ijk	1.00jkl
		颖壳 Glume	3.39j	23.69jk	36.50de	0.25fghijk	0.90de	2.33fghij
	济麦 22 Jimai-22	叶片 Leaf	3.26j	40.30hi	22.95e	0.17k	0.22ijk	10.07d
		茎秆 Stem	5.28ghij	18.46kl	45.13d	0.35defgh	1.10d	3.37efg
		籽粒 Grain	28.28c	74.03cd	146.66a	0.23fghijk	0.11jk	0.82kl
		颖壳 Glume	3.73j	31.56ij	39.32de	0.13k	0.58fg	1.09jkl
ANOVA	水分×品种 Water × variety		***	***	***	***	***	*
	水分×器官 Water × organ		***	**	***	***	***	***
	品种×器官 Variety × organ		***	***	**	***	***	***
	水分×品种×器官 Water × variety × organ		***	***	**	***	***	*

CK: 正常供水; D: 水分亏缺。小写字母不同表示不同水分条件、不同品种、不同器官间在 P<0.05 水平差异显著; *: 0.05 水平因素间互作显著; **: 0.01 水平因素间互作显著; ***: 0.001 水平因素间互作显著。CK: normal water supply; D: water deficit. Values of different organs of different varieties under different water conditions in a column followed by different lowercase letters are significantly different (P < 0.05). *, ** and *** indicate significantly interactive effects at P < 0.05, P < 0.01 and P < 0.001, respectively.

WUE_{yield}显著高于‘沧麦 6001’。水分亏缺条件下, ‘沧麦 6001’总耗水量、地上干物重显著高于其他两品种; 产量和 $WUE_{biomass}$显著高于‘邯麦 9’。‘邯麦 9’总耗水量显著高于‘济麦 22’, 而 WUE_{yield}显著低于‘济麦 22’。

与正常水分相比, 水分亏缺条件下, ‘邯麦 9’总耗水量、地上干物重、产量、$WUE_{biomass}$和 WUE_{yield}均显著下降, 分别为 18.77%、33.51%、39.42%、18.26%和 25.70%。‘济麦 22’的耗水量和地上干物重显著降低 21.01%和 22.45%, 产量和 $WUE_{biomass}$未显著改变; 而 WUE_{yield}显著增加了 22.14%。值得注意的是, 水分亏缺条件下, ‘沧麦 6001’除耗水量无显著变化外, 地上干物重、产量、$WUE_{biomass}$和 WUE_{yield}显著增加, 分别为 78.49%、142%、83.06%、148%。以上结果说明, 一定程度的水分亏缺大大提高了‘济麦 22’和‘沧麦 6001’的水分利用效率, 并利于‘沧麦 6001’的显著增产。

此外, 水分因素对小麦总耗水量、WUE_{yield}影响极显著; 对 $WUE_{biomass}$影响显著。品种因素、品种和水分互作对总耗水量、地上干物重、产量、WUE_{yield}和 $WUE_{biomass}$均影响极显著。

表 3　水分亏缺对不同小麦品种干物重、产量和水分利用效率的影响
Table 3　Effect of water deficit on dry matter weight, yield, and WUE of different wheat varieties

水分 Water condition	品种 Variety	总耗水量 Total water consumption (mm)	地上干物重 Dry matter weight (kg·m^{-2})	产量 Yield (g·m^{-2})	$WUE_{biomass}$ (g·m^{-2}·mm^{-1})	WUE_{yield} (g·m^{-2}·mm^{-1})
正常 Normal	沧麦 6001 Cangmai-6001	385.50±5.76b	0.93±0.14e	234.80±27.63d	2.42±0.34c	0.61±0.07c
	邯麦 9 Hanmai-9	419.69±9.54a	1.88±0.20a	748.88±80.86a	4.49±0.44a	1.79±0.20a
	济麦 22 Jimai-22	354.39±12.19c	1.47±0.06bc	497.12±17.25bc	4.15±0.27ab	1.40±0.03b
亏缺 Drought	沧麦 6001 Cangmai-6001	374.50±7.79b	1.66±0.21ab	568.00±102.02b	4.43±0.48a	1.51±0.24ab
	邯麦 9 Hanmai-9	340.93±11.42c	1.25±0.06cd	453.65±55.47c	3.67±0.21b	1.33±0.16b
	济麦 22 Jimai-22	279.92±9.88d	1.14±0.04de	478.77±18.64bc	4.09±0.04ab	1.71±0.01a
ANOVA	水分 Water	**	ns	ns	*	**
	品种 Variety	**	**	**	**	**
	水分×品种 Water × variety	**	**	**	**	**

CK: 正常供水; D: 水分亏缺。小写字母不同表示不同水分条件、不同品种在 P<0.05 水平差异显著; *: 0.05 水平因素间互作显著; **: 0.01 水平因素间互作显著; ns: 因素间互作不显著。CK: normal water supply; D: water deficit. Values of different varieties under different water conditions in a column followed by different lowercase letters are significantly different (P < 0.05); * and ** indicate significantly interactive effects at P < 0.05 and P < 0.01, respectively. ns: indicates not significantly interactive effect.

2.5　矿质元素含量与小麦干物质量、产量和水分利用效率的相关性分析

由表 4 可见, 不同的矿质元素含量与小麦干物重、产量以及水分利用效率之间呈一定的相关关系。其中, Cu 和 Zn 之间呈显著正相关, Mn 和 Ca 之间呈极显著正相关; 而 Na 和 Cu、Zn 之间分别呈显著和极显著负相关, 说明矿质元素之间存在一定的促进和拮抗。产量分别与 $WUE_{biomass}$ 和 WUE_{yield} 之间, 且 $WUE_{biomass}$ 和 WUE_{yield} 之间均呈极显著正相关, 这说明成熟期可通过进一步促进水分利用效率提高产量。此外, 干物重分别与 Cu 和 Zn 呈极显著和显著正相关, 与 Mn 和 Ca 呈极显著负相关, 但各矿质元素和干物重均与产量之间无显著的直接相关, 这可能与品种本身以及品种和水分互作影响有关。

表 4　矿质元素含量和小麦干物重、产量、水分利用效率的相关性
Table 4　Pearson correlation coefficients between element content and wheat dry matter weight, yield and WUE

	Cu	Mn	Zn	Fe	Na	Ca	干物重 Dry matter	产量 Yield	生物量水分利用效率 $WUE_{biomass}$	产量水分利用效率 WUE_{yield}
Cu	1									
Mn	−0.003	1								
Zn	0.447*	0.140	1							
Fe	−0.192	0.018	−0.100	1						
Na	−0.493*	−0.303	−0.651**	0.334	1					
Ca	−0.258	0.786**	−0.367	0.098	−0.095	1				
干物重 Dry matter	0.520**	−0.527**	0.490*	−0.128	−0.311	−0.646**	1			
产量 Yield	0.142	−0.110	−0.285	−0.241	−0.175	0.030	0.027	1		
$WUE_{biomass}$	0.091	−0.054	−0.193	−0.227	−0.257	0.045	−0.067	0.903**	1	
WUE_{yield}	0.069	−0.088	−0.188	−0.319	−0.25	0.039	−0.070	0.882**	0.943**	1

*: 0.05 水平相关性显著; **: 0.01 水平相关性显著. *: significant correlation at P < 0.05. **: significant correlation at P < 0.01.

3　结论和讨论

矿质元素是构成植物体内许多重要有机化合物的组成成分, 不同元素之间存在一定的相互抑制或相互促进, 同时也会被土壤中其他离子影响, 从而促进或抑制小麦的生长[14]。不同矿质元素的含量和积累量因水分胁迫程度以及时间长短而明显不同, 本研究结果表明, 水分亏缺下, ‘沧麦 6001’和‘邯麦 9’籽粒中 Fe 元素含量和积累量显著增加, 其余器官显著下降; ‘济麦 22’籽粒 Fe 含量和积累量均显著下降, 而茎秆 Fe 积累量增加, 这可能是由于水分亏缺阻止了该品种 Fe 元素由茎秆向籽粒的运输。Zn 在植株体内移动性较大, 小麦灌浆期籽粒 Zn 有 36.64%来自营养器官 Zn 的转移, 其中茎秆贡献率最高[15]。本研究表明水分亏缺条件下, ‘沧麦 6001’籽粒 Zn 含量和 Zn 积累量变化不显著, 茎秆 Zn 含量和积累量显

著降低; ‘邯麦 9’籽粒和茎秆中 Zn 含量和积累量均显著增加; 而‘济麦 22’籽粒 Zn 含量和积累量显著增加, 茎秆 Zn 含量和积累量均无显著变化, 这是由于籽粒 Zn 含量存在品种间差异[16]。戴媛等[10]指出小麦幼苗体内的铁、锌含量及吸收量随干旱程度增加而增加, 其分析是小麦幼苗失水时叶片蒸腾拉力增加和根系吸收能力增强的共同结果。此外, 还应考虑到品种本身的基因型差异[17]。

张凯等[18]报道了在一定缺水条件下, 一些小麦品系的籽粒中 Mn 含量高, Cu 含量低。而其他器官 Cu 和 Mn 含量主要与参与调节光合作用和抗氧化酶活性有关[19-20]。谭晓荣等[11]指出小麦幼苗中 Cu、Mn 含量在适度干旱下可增加, 而过度干旱下则降低。本研究结果显示, 水分亏缺条件下, ‘邯麦 9’和‘济麦 22’籽粒 Cu 含量和积累量均显著下降, ‘沧麦 6001’籽粒 Cu 含量变化不显著, 但 Cu 积累量大幅增加; 3 个品种植株全株的 Cu 含量和 Cu 积累量均下降; 3 品种籽粒 Mn 含量无显著变化, 而‘沧麦 6001’和‘邯麦 9’植株全株的 Mn 含量和积累量降低, ‘济麦 22’植株 Mn 积累量增加。以上结果说明籽粒 Cu、Mn 含量差异除了受水分条件影响还可能与不同品种的染色体组类型有关[17]。

研究 Na、Ca 元素含量及积累有利于了解植物对渗透胁迫的调控[9,21-22]。本研究结果显示, 3 个品种均以籽粒 Na、Ca 含量最低; 叶片 Ca 含量最高, 茎秆 Na 含量最高。水分亏缺下, ‘邯麦 9’和‘济麦 22’籽粒 Ca 显著增加; 且 3 个品种 Na 和 Ca 积累量均增加, 说明一定程度的干旱会改善不同小麦品种的籽粒品质。干旱促进矿质元素含量增加可能是由于小麦失水促进蒸腾拉力增大, 使矿质元素在木质管中的运输速率增大, 所以植株体内元素含量增加[23]。本研究结果显示, 水分亏缺条件下, ‘沧麦 6001’叶片、茎秆 Na 含量以及‘济麦 22’茎秆 Na 含量、颖壳 Ca 含量均显著降低。孙岩[24]指出, 根部和叶部含 Ca 量随着干旱程度的加重而减少。而干旱降低矿质元素吸收可能是由于随着胁迫加重导致植物根系活力下降或者根系部分死亡, 使吸收离子的能力减弱或者吸收面积减少导致[23]。

干旱条件下, 施锰肥可使玉米叶片的净光合速率和短时水分利用效率明显提高[25]。李孟华等[26]指出叶面喷锌有使小麦增产的趋势, 但不会显著影响小麦产量。定额灌溉(120 mm)比传统灌溉(200 mm)更有利于矿物质元素的吸收和利用, 但产量显著下降[27]。本研究结果表明, 水分亏缺显著降低‘邯麦 9’生物量、产量和水分利用效率; 显著降低‘济麦 22’生物量, 但显著增加 WUE_{yield}, 而产量和 $WUE_{biomass}$ 无显著变化。特别是‘沧麦 6001’在水分亏缺下干物重、产量、$WUE_{biomass}$ 和 WUE_{yield} 均显著增加。这可能是由于该品种本身属于抗旱节水型品种, 但抗倒伏性一般[28]所致。在本试验正常水分条件下该品种营养生长过旺, 周期较长, 抽穗迟; 且抽穗前发生一定程度倒伏, 导致群体荫蔽, 不利于光合制造物向籽粒转运, 无效穗增多, 产量较低。而适当的水分亏缺可以促进该品种由营养生长向生殖生长转变, 及时抽穗, 避免了因长时间营养生长带来的不利和损失。其次, 水分亏缺导致‘沧麦 6001’籽粒 Cu 的积累量增加, 而‘邯麦 9 号’和‘济麦 22’全株 Cu 积累量分别下降 64.45%和 26.49%, 可能影响了光合作用和抗氧化酶活性[20-21]。而水分胁迫下‘沧麦 6001’全株 Cu 积累量下降了 3.82%, 主要来自于叶片和颖壳的 Cu 积累量和含量下降, 而不是对土壤 Cu 的吸收, 说明‘沧麦 6001’不同器官间 Cu 的分配比例协调平衡可能是改善干旱胁迫下‘沧麦 6001’产量的另一重要原因。本研究还表明, 在水分亏缺下, ‘济麦 22’叶片、籽粒、茎秆、颖壳中 Fe 含量和积累量和‘邯麦 9’叶片、籽粒、茎秆、颖壳中 Mn 含量和积累量均显著下降, 从而影响了叶绿素调控光合作用和抗氧化酶活性[18], 这可能是水分亏缺分别降低这两个品种籽粒产量的又一因素。

相关分析表明, 干物重与 Cu 和 Zn 含量呈显著正相关, 与 Mn 和 Ca 含量呈极显著负相关, 但各元素含量和干物重均与产量和水分利用效率之间相关性不显著, 该结果可能由于干物质更多地受水分因素影响或者水分和品种互作影响。但矿质元素可能通过影响干物重间接调控水分利用效率的趋势是存在的, 由于矿质元素在水分亏缺下参与抵抗干旱胁迫, 间接影响植株水分平衡来影响干物质积累, 降低了向籽粒运转的效率, 从而未直接影响产量和水分利用效率, 该研究尚需进一步研究和验证。产量分别与 $WUE_{biomass}$ 和 WUE_{yield} 呈极显著正相关, 说明高产与高效用水的同步性[29]。土壤中 Fe 元素增加会减少小麦籽粒对 Zn、Cu、Mn 的吸收, Zn 元素会促进 Fe 元素的吸收, 而 Mn 元素对其他阳离子微量元素的吸收无明显影响[30-31]。本研究结果表明小麦植株体内 Cu 和 Zn 之间、Mn 和 Ca 之间均呈显著正相关, Na 与 Cu、Zn 均呈显著负相关, Fe 元素与其他元素间没有明显相关性, 这说明外界 Fe、Zn、Cu、Mn 等元素之间存在的相互促进或抑制关系可能随着植株吸收利用而改变, 从而在植株体内重新建立相互促进和相互拮抗的复杂关系, 以调节植株

生长。

综上, 从节水增效促优角度分析, 水分亏缺下, ‘沧麦 6001’更利于高产高效, 籽粒 Fe 含量增加, 但需补充一定的 Mn 元素, 该品种可适合在水资源缺乏地区种植; ‘济麦 22’在保证不减产的情况下提高了水分利用效率, 并补充一定 Fe 元素保证品质, 该品种同样适合水分亏缺和正常地区种植; ‘邯麦 9’在水分亏缺条件下产量和水分利用效率均显著下降, 且籽粒中 Cu 和 Mn 积累下降明显, 因此该品种更适合水分条件较好的地区种植。在实际生产中, 应该根据当地资源条件和人们饮食结构, 合理控制水分和微肥、选择利于高产优质的小麦品种。

参考文献 References

[1] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 82–87
Lu J L. Plant Nutrition Science[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 82–87

[2] Yuan Z J, Shen Y J. Estimation of agricultural water consumption from meteorological and yield data: A case study of Hebei, North China[J]. PLoS One, 2013, 8(3): e58685

[3] Welch R M, Graham R D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(396): 353–364

[4] Chen W, Feng C, Guo W, et al. Comparative effects of osmotic-, salt- and alkali-stress on growth, photosynthesis, and osmotic adjustment of cotton plants[J]. Photosynthetica, 2011, 49(3): 417–425

[5] 周晓阳, 赵楠, 张辉. 水分胁迫下中东杨气孔运动与保卫细胞离子含量变化的关系[J]. 林业科学研究, 2000, 13(1): 71–74
Zhou X Y, Zhao N, Zhang H. Relation of stomatal movement and ion content change of guard cells in populus berolinensis under water stress[J]. Forest Research, 2000, 13(1): 71–74

[6] Maathuis F J. Physiological functions of mineral macronutrients[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12(3): 250–258

[7] 白艳波, 李娇, 张宝龙, 等. 干旱胁迫对植物矿质元素影响的研究进展[J]. 生物技术通报, 2013, (3): 15–18
Bai Y B, Li J, Zhang B L, et al. Research advance on effect of drought stress on mineral elements of plant[J]. Biotechnology Bulletin, 2013, (3): 15–18

[8] 周芳. 小麦生长及养分吸收对局部根区水分胁迫的响应机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014: 32–35
Zhou F. Responses of growth and nutrient uptake in wheat seedlings to partial root-zone water stress and its mechanisms[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014: 32–35

[9] 周瑞莲, 赵彦宏, 赵哈林, 等. 钠盐对冬小麦抗旱性增效作用调控机理的生理生态学分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 784–792
Zhou R L, Zhao Y H, Zhao H L, et al. Ecological and physiological analysis of effect of different types of sodium salt treatment on winter wheat resistance to drought[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 784–792

[10] 戴媛, 伏毅, 谭晓荣. 干旱对小麦幼苗 Fe、Zn 含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(5): 839–843
Dai Y, Fu Y, Tan X R. Effect of different drought treatment on Fe and Zn content of wheat seedlings[J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(5): 839–843

[11] 谭晓荣, 戴媛, 伏毅. 干旱对小麦幼苗 Cu、Mn 含量的影响及其机理研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 152–159
Tan X R, Dai Y, Fu Y. Effect of drought on content of copper and manganese in wheat seedlings and related mechanism[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 152–159

[12] 王凤茹, 张晓红. 干旱逆境下小麦幼苗细胞叶绿体内钙离子浓度变化的电镜细胞化学研究[J]. 电子显微学报, 2002, 21(2): 106–109
Wang F R, Zhang X H. Cytochemistry of Ca^{2+} in the chloroplast of the wheat seedling under water stress[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2002, 21(2): 106–109

[13] 刘月岩, 刘会灵, 乔匀周, 等. CO_2 浓度升高对不同水分条件下冬小麦生长和水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1365–1370
Liu Y Y, Liu H L, Qiao Y Z, et al. Effects of elevated CO_2 concentration and different water conditions on winter wheat growth and water use[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(11): 1365−1370

[14] Zhang W, Liu D Y, Liu Y M, et al. Zinc uptake and accumulation in winter wheat relative to changes in root morphology and mycorrhizal colonization following varying phosphorus application on calcareous soil[J]. Field Crops Research, 2016, 197: 74–82

[15] 姜丽娜, 张黛静, 蒿宝珍, 等. Zn 在不同品种小麦植株地上部的积累和分配研究[J]. 华北农学报, 2010, 25(5): 187–192
Jiang L N, Zhang D J, Hao B Z, et al. Study on Zn accumulation and distribution in aboveground plant of different wheat varieties[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(5): 187–192

[16] 郝志, 田纪春, 姜小苓. 小麦主要亲缘种籽粒的 Fe、Zn、Cu、Mn 含量及其聚类分析[J]. 作物学报, 2007, 33(11): 1834–1839
Hao Z, Tian J C, Jiang X L. Analyses of Fe, Zn, Cu, and Mn contents in grains and grouping based on the contents for main kindred germplasm of common wheat (*Triticum aestivum*)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(11): 1834–1839

[17] 赵俊霞, 乔鲜花, 张萍萍, 等. 不同基因型小麦籽粒铁含量的差异及其与农艺性状的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 114–118
Zhao J X, Qiao X H, Zhang P P, et al. Difference of Fe content of wheat seed between high-Fe genotypes and low-Fe ones and its relation to agronomic characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 114–118

[18] 张凯, 崔玉亭, 周顺利, 等. 两种水分条件下冬小麦籽粒部分微营养含量及其基因型差异研究[J]. 华北农学报, 2007,

22(5): 19–23
Zhang K, Cui Y T, Zhou S L, et al. Study of part micronutrition contents of winter wheat grains and genotypes diversity under two kind irrigation conditions[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22(5): 19–23
[19] 印莉萍, 黄勤妮, 吴平. 植物营养分子生物学及信号转导[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 294–300
Yin L P, Huang Q N, Wu P. Plant Nutrition Molecular Biology and Signal Transduction[M]. Beijing: Science Press, 2006: 294–300
[20] 任立民, 刘鹏. 锰毒及植物耐性机理研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 357–367
Ren L M, Liu P. Review of manganese toxicity & the mechanisms of plant tolerance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 357–367
[21] 肖磊, 刘博, 张彦波, 等. 外源钙对逆境胁迫下小麦的保护效应[J]. 河南科技学院学报: 自然科学版, 2016, 44(5): 17–20
Xiao L, Liu B, Zhang Y B, et al. Protective effect of exogenous calcium on wheat under adversity stress[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2016, 44(5): 17–20
[22] 蔡建一. 小麦 Na^+吸收途径及 Na^+在霸王适应渗透胁迫中的生理作用[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 35–36
Cai J Y. Low-affinity Na^+ uptake in wheat and the physiological role of Na^+ in adapting to osmotic stress in *Zygophyllum xanthoxylum*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010: 35–36
[23] Gong J M, Lee D A, Schroeder J I. Long-distance root-to-shoot transport of phytochelatins and cadmium in *Arabidopsis*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(17): 10118–10123
[24] 孙岩. 水分胁迫对冬小麦的生长发育、生理特征及其养分运输的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007: 39–41
Sun Y. Influences of water stress on growth and development, physiological characteristics and nutrient distribution of winter wheat[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007: 39–41
[25] 魏孝荣, 郝明德, 邱莉萍. 土壤干旱条件下锰肥对夏玉米光合特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 255–258
Wei X R, Hao M D, Qiu L P. Effect of manganese fertilizer on maize photosynthetic performance under soil drought condition[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 255–258
[26] 李孟华, 王朝辉, 王建伟, 等. 低锌旱地施锌方式对小麦产量和锌利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, (6): 1346–1355
Li M H, Wang Z H, Wang J W, et al. Effect of Zn application methods on wheat grain yield and Zn utilization in Zn-deficient soils of dryland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, (6): 1346–1355
[27] 吴娜, 卜洪震, 曾昭海, 等. 灌溉定额对夏播裸燕麦产量和品质的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(5): 204–209
Wu N, Bu H Z, Zeng Z H, et al. Effects of irrigation quota on yield and quality of summer-sown, naked oat[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(5): 204–209
[28] 农业部小麦专家指导组. 小麦高产创建示范技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 128
Wheat Expert Pannel Appointed by Ministry of Agriculture. Demonstration Technology of High-yielding Establishment in Wheat[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 128
[29] 张建军, 唐小明, 党翼. 灌水量及其分配方式对冬小麦水分利用效率、光合特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(1): 85–90
Zhang J J, Tang X M, Dang Y. Effects of irrigation quantity and irrigation ways on water use efficiency, photosynthetic characters and yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(1): 85–90
[30] Ghasemi-Fasaei R, Ronaghi A. Interaction of iron with copper, zinc, and manganese in wheat as affected by iron and manganese in a calcareous soil[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(5): 839–848
[31] 杨习文, 田霄鸿, 陆欣春, 等. 喷施锌肥对小麦籽粒锌铁铜锰营养的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 95–102
Yang X W, Tian X H, Lu X C, et al. Effect of foliar zinc application on the micronutrients of wheat grain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 95–102